

Estudi de l'amplada límit requerida en un canal hidrodinàmic per evitar el efecte de bloc d'ones

Treball Final de Grau



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:
Álvaro Martín Martín

Dirigit per:
Anna Mujal-Colilles

Grau en Enginyeria en Sistemes i Tecnologia Naval

Barcelona, 07/12/2018

Departament de Ciència i enginyeria nàutiques



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona



Agraïments

En primer lloc voldria expressar la meva gratitud a la meva tutora Anna Mujal, per recolzar-me i donar-me l'oportunitat de treballar en un tema tan interessant i per l'esforç i la voluntat d'ajudar amb l'escàs temps del que disposava.

Degut a la impossibilitat de trobar un/a tutor/a des del juliol, després de que fins a sis professores rebutgessin portar-me el TFG, l'Anna em va proposar fer un treball, conscient del poc temps i possibles dificultats que comportava. Ja que hem tingut poc més de dos mesos per a la realització del mateix amb un programa informàtic, el qual, no havia utilitzat mai abans.

Vull donar també les gràcies als meus pares per el suport material i emocional que m'han donat durant tota la carrera, i especialment aquests més de dos mesos de desenvolupament del TFG. Sent conscient que no hagués tingut sense ells, ni molt menys, el temps necessari per dedicar per complet totes les hores fora de l'horari laboral a fer el treball.

I finalment no vull oblidar a les lluites constants de la classe treballadora per impulsar una universitat pública i de qualitat, amb un accés encara restringit a moltes joves, havent-me donat la possibilitat d'estudiar aquest grau.

Resum

En aquest treball es tractarà de resoldre una qüestió no regulada per la ITTC; l'amplada mínima necessària en un canal hidrodinàmic per tal d'evitar l'efecte de bloc. Aquest efecte de bloc, causat pel rebot de les onades de l'estela en les parets del canal, produïdes pel model d'embarcació en el seu pas pel canal, pot interferir en l'estudi del model a analitzar.

Les proves realitzades fins a l'actualitat han tractat de pal·liar aquest efecte amb coeficients de compensació i formules aproximades, en relació amb l'eslora del model o la profunditat del canal.

Durant aquest treball s'exposaran les diferents solucions utilitzades fins la data d'avui, tractant de posar en context la necessitat d'aquesta investigació i es tractarà de resoldre aquesta qüestió gràcies a les eines CFD mitjançant el programa SeaFEM. Aquest procés es reproduirà a través d'una sèrie de simulacions del comportament de les onades per a diferents amplades de canal per a un mateix model d'embarcació.

L'objectiu d'aquest estudi és trobar una relació entre màniga del model i ample del canal, per delimitar amb exactitud l'escala mínima d'ús en assajos de resistència a l'avanç en canal.

Abstract

In this work I will try to solve a question not regulated by the ITTC; the necessary minimum width in a hydrodynamic channel to avoid the blockage effect. This block effect, caused by the waves bouncing on the walls of the channel, produced by the boat model to be analyzed as it passes through the channel, may interfere with the behavior of the model to be studied.

The tests carried out to date have tried to mitigate this effect with compensation coefficients and approximate formulas, in relation to the length of the model or the depth of the channel.

During this work, the different solutions used to date will be presented trying to put in place the need for this research and will try to resolve this issue thanks to the tools CFD through the SeaFEM program, through a series of simulations of the behavior of the waves for different channel widths for the same model of boat.

The objective of this study is to find a relation between beam model and the amplitude of the channel, to precisely delimit the minimum resistance tests scale of the advance resistance in the channel.

Sumari

AGRAÏMENTS	2
RESUM	3
ABSTRACT	4
SUMARI	5
LLISTAT DE FIGURES	7
LLISTAT DE TAULES	8
LLISTAT D'ABREVIATURES	8
INTRODUCCIÓ	9
ESTAT DE L'ART	10
OBJECTIU	13
METODOLOGIA	14
DESCRIPCIÓ DEL PROBLEMA	14
DIFICULTATS	17
FÓRMULA	20
RESULTATS	22
AMPLADA/MÀNIGA 8 I 12	22
AMPLADA/MÀNIGA 16, 25 I 33	24
FR = 0'45	26
FR = 0'32	27
FR = 0'15	28
CONCLUSIÓ	29
FUTURS ESTUDIS	30

BIBLIOGRAFIA	31
---------------------	-----------

ANNEXES	34
----------------	-----------

Llista d'il·lustracions, taules i gràfiques

Figura 1	14
Figura 2	15
Figura 3	16
Figura 4	17
Figura 5	17
Figura 6	18
Figura 7	19
Figura 8	20
Figura 9	20
Figura 10	23
Figura 11	24
Figura 12	25
Figura 13	26
Figura 14	26
Figura 15	27
Figura 16	28
Figura 17	30

Llistat de taules

Taula 1	22
Taula 2	27
Taula 3	28
Taula 4	28

Llista d'abreviatures

L	Eslora
B	Màniga
T	Calat
A_x	Àrea mestre
b	Ample del canal
A	Àrea transversal del canal
m	A _x /A
Fr	Numero de Froude
V	Velocitat
ΔV/V	Correcció de velocitat degut al efecte d'ones
ρ	Densitat
C_w	Coeficient de resistència a l'avanc

Introducció

En aquest treball intentarem resoldre una de les limitacions dels tests als canals de proves. A través de diferents simulacions numèriques es tractarà d'esbrinar quin es el mínim d'amplada de canal necessari en funció de la màniga del model per a no tenir, o tenir el mínim possible, d'interferències per l'efecte de bloc d'ones als resultats de resistència a l'avanç del model.

Les simulacions realitzades al programa SeaFEM es classificaran en funció del número de Froude i no per geometria, per a facilitar la comparació, podent veure clarament així els resultats del treball.

En primer lloc es posarà a la persona lectora en context amb una breu introducció de la història dels canals hidrodinàmics, fins a les simulacions CFD, passant per l'existència de la ITTC.

Aquesta organització internacional regula tots els procediments adequats per a un bon assaig hidrodinàmic però no inclou cap apartat on expliqui les dimensions exactes del canal a utilitzar, més enllà d'un parell de relacions respecte al calat o l'eslora del model. Per aquest motiu s'intentarà determinar aquesta mesura que seria de gran utilitat a nivell mundial.

L'explicació d'aquest procés d'estudi es comença amb la part de metodologia; on es determina la descripció del problema i les seves dificultats trobades des de un punt de vista tècnic. Posteriorment s'exposen els resultats obtinguts durant aquest estudi i es comenten amb l'ajuda de gràfiques i taules.

Per acabar s'engloba l'idea extreta de l'estudi a l'apartat de conclusions i es deixa oberta la porta a noves investigacions en aquesta línia en l'apartat de futurs estudis.

A les últimes pàgines del treball es poden trobar les fonts utilitzades per a la realització d'aquest treball a la bibliografia, i seguidament, per a més interès sobre la temàtica tractada es troben els annexos. Allà es pot veure la part de codificació inicial del programa.

Estat de l'art

Un canal d'assajos hidrodinàmics són unes instal·lacions on un model de vaixell, construït a escala de la embarcació real, s'utilitza per dur a terme proves hidrodinàmiques amb l'objectiu de dissenyar un nou vaixell o refinar el disseny ja creat per millorar el seu rendiment a la mar.

L'eminent enginyer anglès, William Froude, va publicar una sèrie de documents influents sobre dissenys de vaixells per maximitzar l'estabilitat als anys 1860. Va validar els seus models teòrics amb àmplies proves empíriques, utilitzant maquetes per a les diferents dimensions del casc. Va establir una fórmula (ara coneguda com el nombre de Froude) mitjançant la qual es podrien utilitzar els resultats de proves a petita escala per predir el comportament dels cascos de mida completa. Els seus experiments van ser reivindicats posteriorment en assajos a gran escala, i com a resultat, es va construir el primer canal d'assajos hidrodinàmic. Aquí va ser capaç de combinar l'experiència matemàtica amb l'experimentació pràctica amb un bon efecte. Tant és així que els seus mètodes segueixen encara avui.

Des de llavors s'han anat modernitzant aquest canals de proves fins arribar als que s'utilitzen avui dia. Canals, com el del CEHIPAR, de diversos metres d'ample i centenars de metres de llarg, equipats amb un carro d'arrossegament que pot remolcar el model o seguir el model autopropulsat, i està equipat amb ordinadors i dispositius per registrar o controlar, respectivament, variables com la velocitat, l'empenta i l'impuls de l'hèlix, l'angle del timó, etc.

El canal també pot equipar-se amb un generador d'ones per realitzar proves de *seakeeping*, ja sigui simulant ones naturals (irregulars) o exposant el model a un paquet d'ona, es a dir, a ones regulars. Determinant així el probable comportament marítim del vaixell al funcionar en mars amb amplituds i freqüències d'ones variables. Les modernes instal·lacions de prova de *seakeeping* poden determinar aquestes estadístiques, amb l'ajuda de maquinari i programari adequats, en una única prova.

Tot el procés de desenvolupament d'aquestes proves ve regulat a nivell mundial per la ITTC. La International Towing Tank Conference és una associació voluntària d'organitzacions mundials que tenen la responsabilitat de predir el rendiment hidrodinàmic de vaixells i instal·lacions marines a partir de resultats d'experiments físics i numèrics.

La ITTC existeix d'ençà 1932.

La idea original era promoure la millora de tots els aspectes del model de vaixell i arribar a un acord sobre procediments bàsics i mètodes de presentació de resultats per a la seva publicació.

Degut a l'auge de la capacitat informàtica i la manca, per part de moltes estudioses, de disposar d'un canal hidrodinàmic on fer proves degut al seu alt cost, es va popularitzar i establir per a tothom una nova manera d'obtenir aquestes dades. Tot mitjançant la simulació informàtica. Aquesta nova forma de càlcul numèric que va començar als anys 80 anomenada CFD, *Computer Fluid Dynamics*.

Amb els computadors d'alta velocitat es poden aconseguir millors solucions i sovint es requereixen per resoldre els problemes més complexos. La investigació a nivell mundial millora constantment la precisió i la velocitat d'escenaris complexos de simulació, com els fluxos transsònics o turbulents. La validació inicial d'aquest tipus de programari normalment es realitza mitjançant un anàlisi empíric d'un problema particular per procedir a la seva comparació.

Fins a dia d'avui cap estudi ha pogut establir un paràmetre per resoldre la qüestió de les interferències d'ones, més enllà de fórmules de compensació de precisió insuficient.

Els problemes de precisió i càlcul durant un anàlisi hidrodinàmic poden classificar-se en 6 grans blocs:

- *Flow confinement*
- *Onset flow turbulence*
- *Onset flow velocity profile*
- *Wave-current interactions*
- *Mooring and floating platforms*
- *Bathymetry*

Molts aspectes dels tests actuals als canals d'assajos hidrodinàmics depenen en gran mesura dels efectes de la superfície lliure, es a dir, de les *wave-current interactions*. La part del model submergida sota l'aigua que interactua amb aquesta crea transmissions d'energies, anomenades onades, les quals creen les interferències a solucionar.

Per a l'anàlisi d'aquests problemes avui dia és possible simular qualsevol tipus de condicions de

la mar. És habitual fer proves per a un model en diferents estats de la mar, des de calma fins a grans onades per a totes les direccions.

Des de que es va establir la teoria de resistència a les onades, es va veure que calien eines matemàtiques de rectificació dels resultats obtinguts als assajos, tant pràctics com simulats per CFD. L'ITTC com a organisme internacional va aprovar les formules de compensació on diversos investigadors van treballar la temàtica de correctors de *blockage*. Un dels més destacats és Kinya Tamura. Les fórmules proposades per aquest enginyer japonès es considera que aproximen, amb gran precisió, les reaccions del model al canal a les reaccions reals que tindrà el vaixell. Encara així, és assumit que poden haver-hi desviacions matemàtiques.

Objectiu

Durant aquest treball es tractarà de resoldre el problema de les limitacions del assajos en canals per a que les interaccions amb les parets laterals del canal no afectin al comportament del model.

La intenció d'aquest anàlisi amb el SeaFEM és trobar l'evolució del coeficient de resistència a les onades respecte a la relació màniga/ample del canal a diferents velocitats.

En aquest cas no tractarem mitjançant el CFD de mesurar les càrregues estructurals que suportaria el model, sinó solament la part hidrodinàmica. L'objectiu es calcular el C_w per a cada un i comparar el coeficient de blocatge $\Delta V/V$.

Aquesta part d'estudi del flux es realitzarà de forma general sense aprofundir en el perquè dels possibles resultats extrets de les simulacions. Fets que ja han sigut molt estudiats. Sinó que es centrarà en una qüestió sorprenentment encara no resolta, en aparença simple. **S'intentarà determinar una relació amplada del canal-mida del model on les correccions de velocitat que avui dia s'apliquen siguin menyspreables** per la seva poca influència, degut mínimes interferències d'ones durant l'assaig del model.

L'objectiu d'aquest treball es veure fins a quin punt podem reduir el corrector de Tamura. El cas ideal seria per a $\Delta V/V = 0$.

Metodologia

El modelat numèric, com a aproximació inicial per al modelat físic, ha servit d'eina per desenvolupar l'estudi de molts aspectes de l'enginyeria, especialment els fluïds. En aquest treball s'han volgut esbrinar les dades necessàries per a assolir l'objectiu del mateix variant només l'amplada del canal a simular.

Una millor optimització de l'estudi, degut al poc temps del que es disposava, fou que els tempos d'anàlisi del programa van ser reduïts al mínim imprescindible per a la correcta realització de la investigació.

Els passos per a realitzar-ho passen, en primer lloc, per definir el problema a resoldre escollint què volem saber i com volem arribar-hi. I en segon lloc quines dificultats aparegudes durant tot el procés anterior.

Tots aquests passos son explicats a continuació.

Descripció del problema

Per a aconseguir els diferents C_w les variables d'entrada al model han estat:

1. La velocitat, variant així el numero de Froude.
2. l'amplada del canal, però en cap cas s'han modificat les condicions ni dimensions del cos a estudiar.

El model de vaixell escollit per al seu estudi és el model Wigley, degut a la seva fàcil expressió matemàtica per definir les seves formes. El model a escala te un metre d'eslora, 0'1 metres de màniga i 0'0625 metres de calat. El canal base, amb el que es va començar a modificar i treballar cap a altres amplades, te 4'83 metres de llargada i 1'6 metres d'amplada i profunditat. Tal i com es pot veure en les següents il·lustracions.

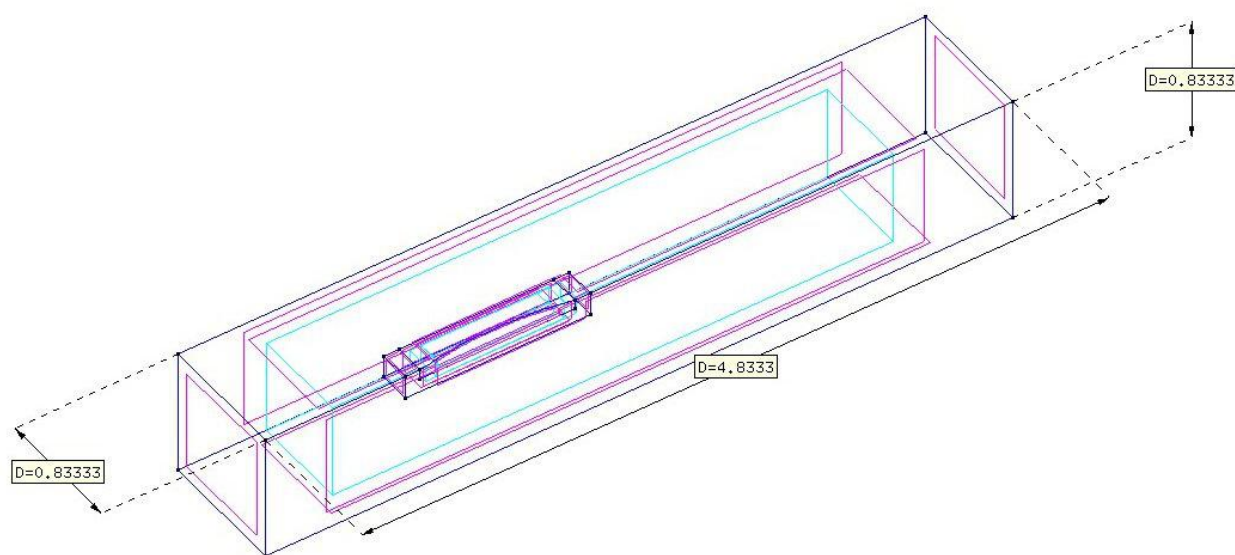


Figura 1. Domini computacional

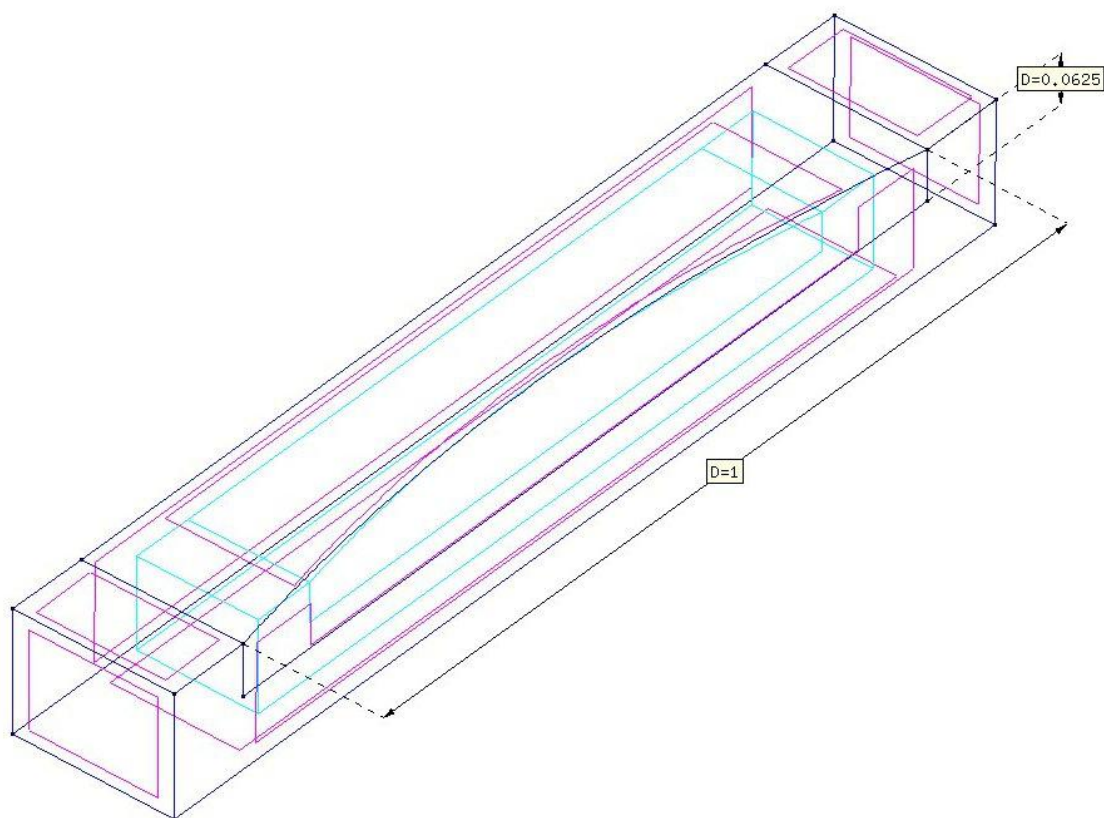


Figura 2. Zoom del domini computacional en la part del vaixell

Els tests realitzats han sigut sempre simulats amb el mateix model de vaixell. Per a obtenir una major agilitat en els càlculs s'ha optat per simular la meitat de canal i vaixell, ja que al ser simètric per a la línia de quilla els efectes seran exactament iguals tant a babord com a estribord; reduint així al 50% la càrrega de càlcul que ha de suportar el CPU.

S'ha agafat com a *computational domain* i *boundary conditions* les ja predeterminades pel programa per al mode *Seakeeping analysis*. Això implica estudiar sobre un fluid incompressible, com entenem que és l'aigua de mar, amb una densitat de $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$.

El volum de control que posteriorment serà analitzat amb malles és el que representa simular el canal hidrodinàmic. Es pot variar la mida i forma del cadascun dels elements d'aquestes malles. Contra més nombre de nodes més precisió tindrà el càlcul, però més difícil, i per tant, lent de calcular serà. En aquest cas vam escollir una mateixa malla per a tots els casos. Com es pot veure en la següent imatge.

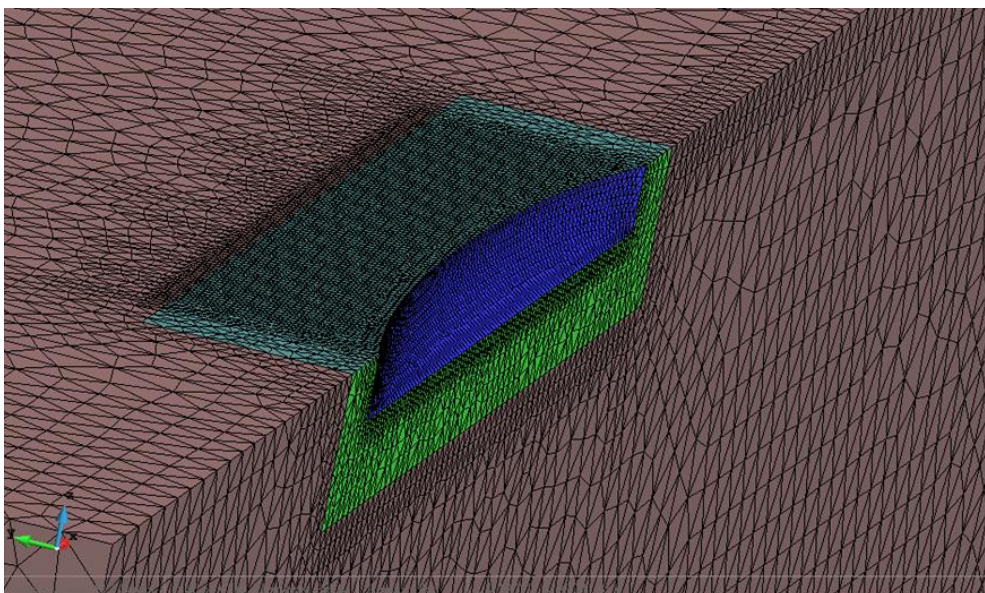


Figura 3. Malla “desestructurada” generada

Per a la generació d'aquestes malles es realitza prèviament uns càlculs segons les formes de la peça i el domini a analitzar i segons el numero i forma de elements a col·locar. Aquest petit càlcul pot ser molt llarg per a geometries poc versemblants.

En la següent imatge podem veure un exemple d'una gràfica, generada automàticament pel mateix programa SeaFEM, on es dibuixa l'evolució en el temps de la creació de la malla vista anteriorment.

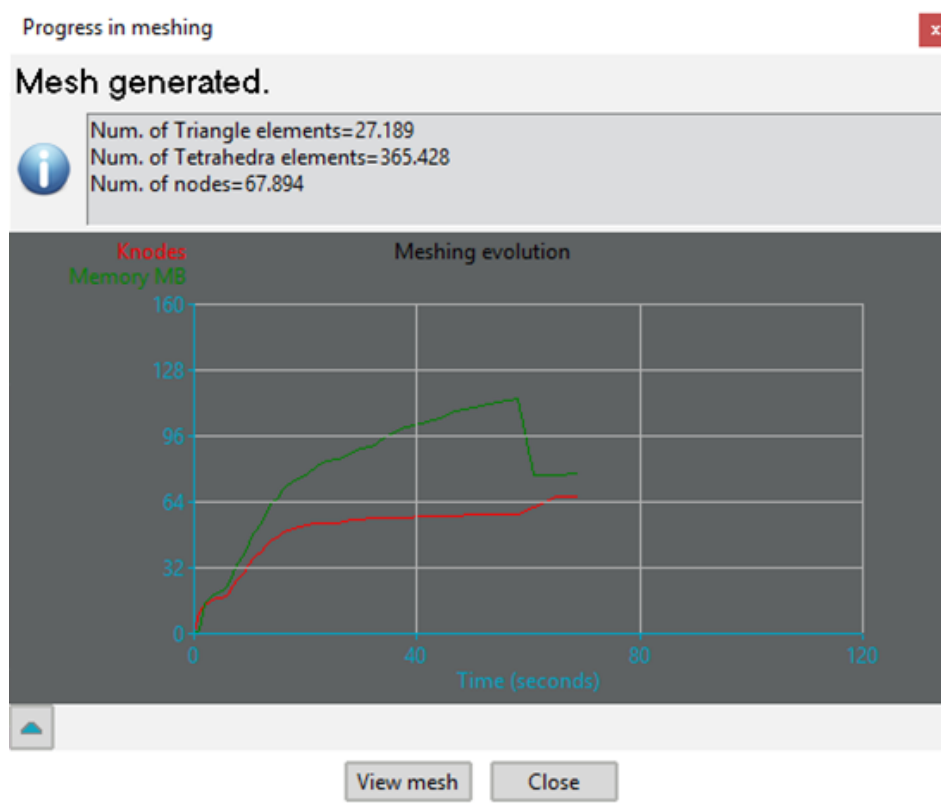


Figura 4. Gràfica de la construcció de malla

Dificultats

En primer lloc vam trobar defectes en la formació de línies a l'hora de refer la superfície superior. Les línies no arribaven a tocar-se entre si pel que el programa no generava un espai tancat per poder formar-hi la superfície on posteriorment ubicar la malla de càlcul.

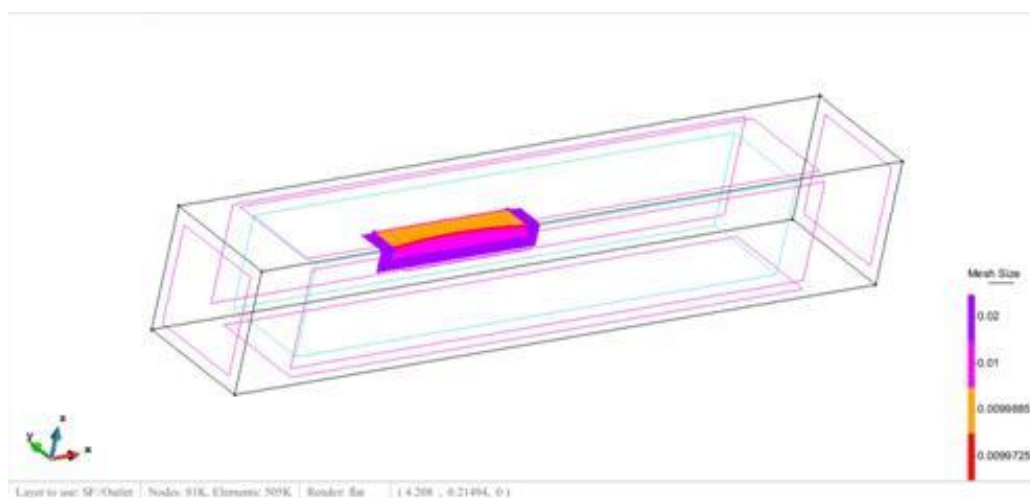


Figura 5. Representació de les mides de malles per colors

Veient la malla establerta prèviament vam decidir mantenir-la, i mitjançant proves, veure quina era la més adequada. Adjudicant una mida màxima per a cada element de 0'01 i 0'02 a les parts més properes al cos (les parts visibilitzades en taronja i vermell es consideren de la mateixa mida que la part rosa, 0'01, però degut a una diferent assignació s'hi produeixen mínimes diferències). La resta de superfície a analitzar es va establir a una mida màxima de 0'05, amb un coeficient de transició de 0'3. Aquest coeficient de transició determina el grau de suavitat de connexió en l'increment de mida dels elements.

Per altra banda, també cal dir que la velocitat d'anàlisi amb la que s'ha treballat durant tot el projecte ha sigut escassa degut a la insuficient capacitat de càlcul del ordinador, arribant en diverses ocasions a bloquejar el portàtil tenint que apagar-lo i tornant a començar de nou, ja que ni tan sols les dades ja generades s'autoguardaven.

La insuficient capacitat de càlcul de l'ordinador es degut a l'escassa eficiència del GPU; degut probablement a l'antiguitat del aparell. En cap cas per un mal us o maltractament tant del hardware com del software durant els anys en us.

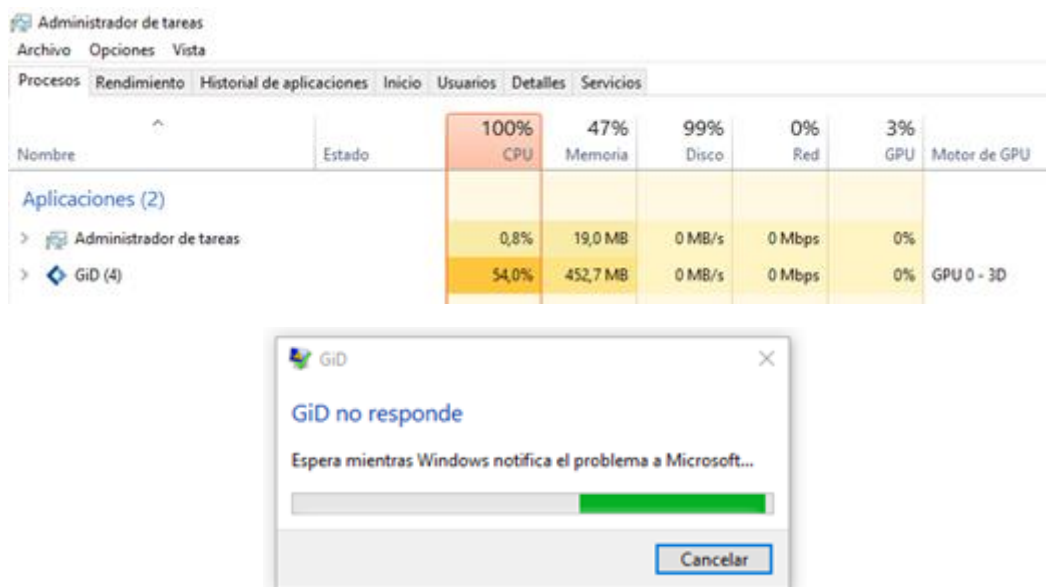


Figura 6. Finestres de col·lapse de l'ordinador

En diferents casos no arribava ni tan sols a arrencar (es pot veure el codi inicial als annexes) i d'altres es col·lapsava a mig anàlisi, degut als problemes d'estabilitat per un incorrecte numero de Courant. Problema ja no de capacitat de l'ordinador, sinó de programació del programa.

Seguidament es pot veure la finestra que sortia cada vegada que el programa es detenia per problemes algorítmics; donant com a resposta l'error detectat.

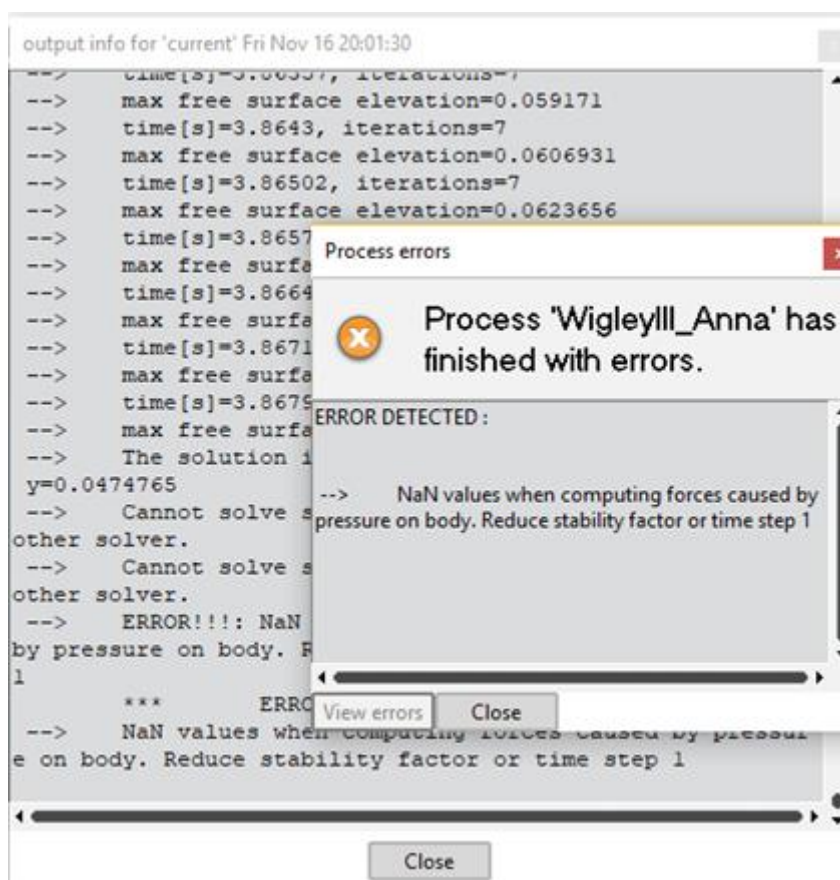


Figura 7. Finestra de detecció d'errors del SeaFEM

Es va trigar més de dues setmanes en resoldre aquest problema per a tres dels casos estudiats. Per a molts altres no va ser possible la seva reconducció cap a un correcte anàlisi.

Per als anàlisis ja finalitzats de manera esperada no hi havia possibilitat de crear un *post-process* a causa, entre d'altres, de la manca de dades per a generar-ho. En el poc temps disponible per a la realització del treball no s'ha pogut esbrinar, ni buscant als documents d'ajuda disponibles a la web del programa com dintre del mateix programa, la solució per a obtenir un arxiu visual on estigues registrat l'evolució del fluid durant el temps de simulació.

L'àrea calculada ens serà necessària per a obtenir la correcció de velocitat degut als efectes d'ones, segons la formula de Tamura proposada per la ITTC.

A la part final del domini (contant com a part final la part més llunyana al cos per popa, cap on es dirigiran les onades) se li aplica una absorció d'ondades anomenat "beach" (platja) d'un metre i mig. Amb això aconseguim, com ja es fa en els canals hidrodinàmics reals, centrar només l'efecte d'interferència a les parets i fons del canal on, a efectes pràctics, sorgeixen els problemes de precisió als tests.

Aquests problemes o desviacions són corregides amb diferents mètodes matemàtics. En el cas d'aquest treball utilitzarem un dels més comuns com és el mètode de Tamura.

$$\frac{\Delta V}{V} = 0'67 \cdot m \left[\frac{L}{b} \right]^{3/4} \cdot \frac{1}{(1 - Fr_h^2)}$$

Per últim cal dir que la fórmula principal del treball és la que determina la resistència per generació d'ones. Determinada de la següent forma.

$$C_w = \frac{2F_d}{\rho V^2 A}$$

Durant tot el treball es computarà milers de vegades aquesta formula. En el major dels casos analitzats s'han extret fins a 9562 outputs. Per a generar amb ells gràfiques que ens mostrin l'evolució d'aquest coeficient per a diferents números de Freud i per a diferents amplades de canal.

Resultats

Els resultats numèrics obtinguts en els diferents casos estudiats mitjançant el CFD estan condicionats per els següents imputs:

- Velocity: velocitats de 0'4290, 0'9395 i 1'2870 m/s, corresponents a números de Froude de 0'15, 0'32 i 0'45.
- Simulation Time: Un temps d'anàlisi de 15 segons. Establert després de fer proves de fins a 30 segons i veure que s'estabilitzava molt abans, i per tant, no era necessari invertir el doble de temps per a aconseguir la mateixa precisió.
- Mesh: Sempre la mateixa mida de malla com marca la taula següent; i amb el mateix coeficient de transició per a aconseguir una òptima connexió entre els diferents elements a mesura que es van engrandint com més allunyats del model es troben.

MIDA DELS ELEMENTS DE LA MALLA	
Superfícies en contacte amb el model	0'01
Superfícies pròximes al model	0'02
Reste de la malla	0'05
Coeficient de transició	0'3

Taula 1. Mida i transició de la malla

A continuació s'exposaran els diferents casos on finalment es va aconseguir treure uns outputs. Tots ells amb la mateixa profunditat de 0'8333 metres, només variant l'amplada del domini; o el que és el mateix, canviant l'amplada del canal.

Primerament es farà referencia als estudis amb resultats erronis. Segons la seva amplada i relació de la mateixa respecte a la màniga del model, 0'05 metres de màniga (0'1 en el model sencer). Per així afavorir una fàcil comprensió a l'hora de comparar tant geometries com resultats.

Amplada/màniga 8 i 12

Ambdós casos van tenir el mateix problema d'alteració algorítmic donant resultats físicament impossibles. Ni augmentant la mida d'element de malla un 100%, empitjorant així la qualitat de l'anàlisi però guanyant en viabilitat numèrica, en una reducció del 25%, ni una del 50% (relació 8'33), com la que es veu a la imatge, van donar resultats congruents.

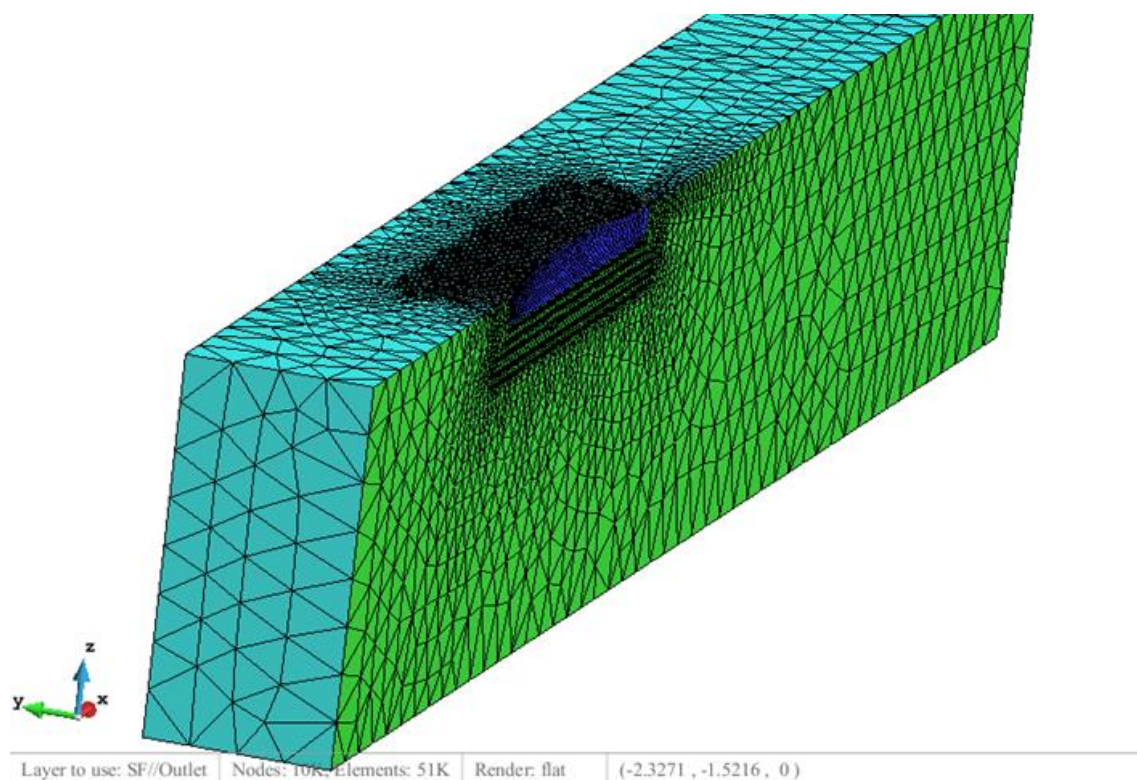


Figura 10. Malla per a relació amplada/màniga 8'33

Remarcar que no hi havia cap tipus de diferència en la desviació per a relacions d'amplada/màniga 8'33 i 12'50. Una vegada l'algoritme es desvia s'ha observat que dona sempre el mateix resultat per a un mateix numero de Froude, es a dir, per a una mateixa velocitat.

Aquestes desviacions es poden considerar en la següent gràfica. Les línies verdes representen els diversos outputs erronis on el algoritme no va aconseguir establitzar-se; arribant fins i tot, a donar valors negatius. Fet sense cap sentit físic que indica clarament la desviació matemàtica.

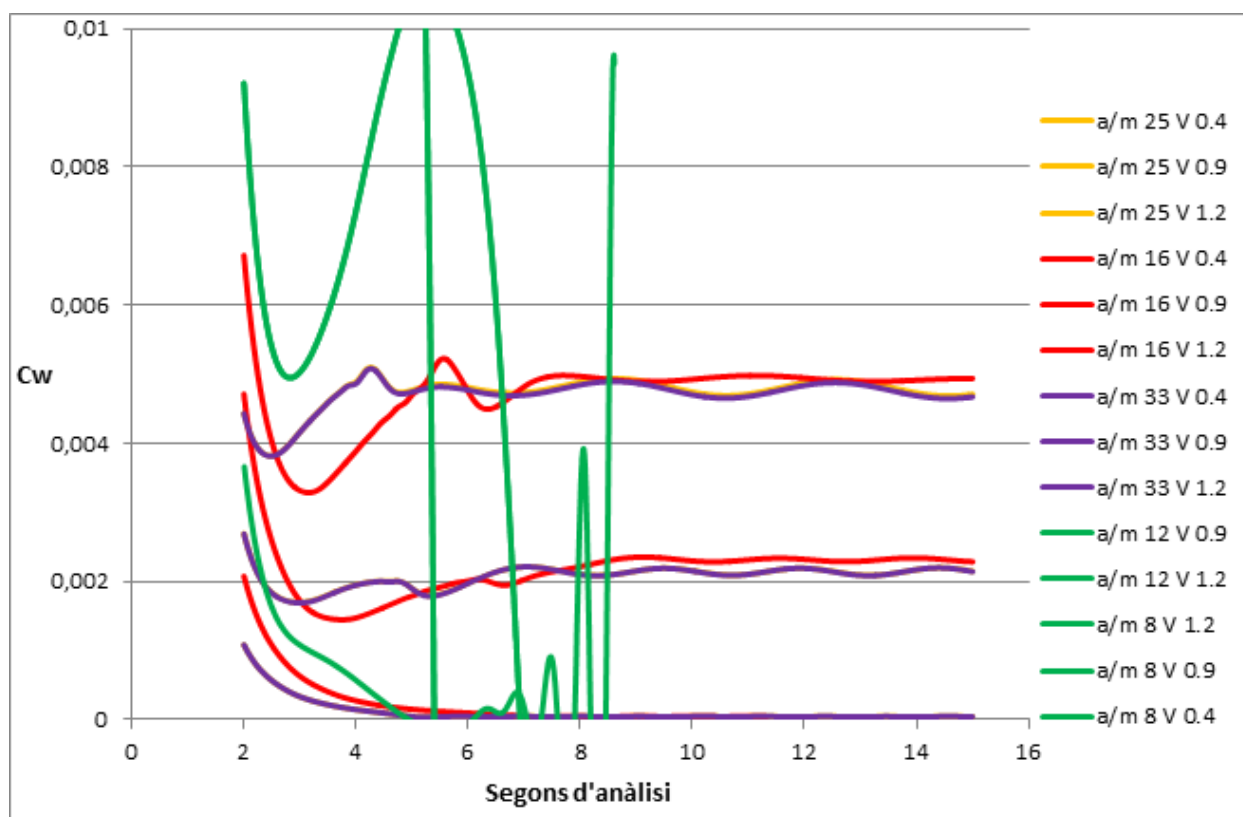


Figura 11. Gràfica del total de resultats

La llegenda de la gràfica mostra totes els casos on s'han aconseguit extreure resultats. Estan classificats segons la seva relació amb l'amplada base (B seguit del numero a multiplicar per arribar a la base representada) i segons la velocitat aplicada per aquell domini (V més la velocitat en metres partit segons simplificat a un decimal).

Amplada/màniga 16, 25 i 33

Per a aquests tres casos amb òptims resultats s'ha optat per classificar per a un mateix numero de Froude, per a poder veure més fàcilment la comparativa entre els diferents C_w ; les quals s'obtenen per a diferents amplades de canal i els seus conseqüents correctors de velocitat. Aquests correctors han sigut calculats posteriorment mitjançant la fórmula de Tamura.

El primer cas de malla de domini ampliat on va donar resultats coherents després d'un procés de càlcul sense problemes és per a 1'25 metres (relació amplada/màniga 25). En la imatge a continuació es pot veure el total del domini analitzat per al cas de una ampliació del 50% respecte de l'amplada base (relació amplada/màniga 16'66).

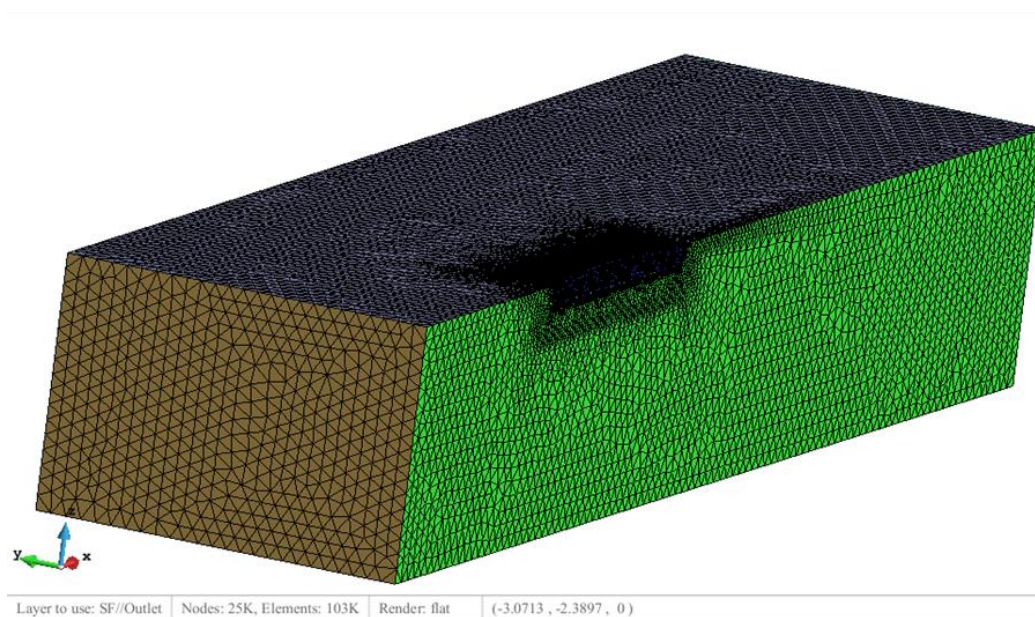


Figura 12. Malla per a relació amplada/màniga 25

Durant el procés d'anàlisi que solia durar entre quatre i cinc hores s'anaven guardant les dades calculades en un arxiu del programa. Aquestes van ser extretes i col·locades a una taula Excel on poder-les representar mitjançant gràfiques.

En la gràfica següent estan representades els resultats generals d'on traurem les conclusions del estudi. Tots el temps invertit en els múltiples anàlisis, tant fallits com amb resultats erronis, queda reduït a aquesta gràfica on es pot comparar la relació C_w segons Froude i amplada.

Després dels diversos anàlisis duts a terme en el programa SeaFEM hem tret els següents resultats dels Outputs generats correctament.

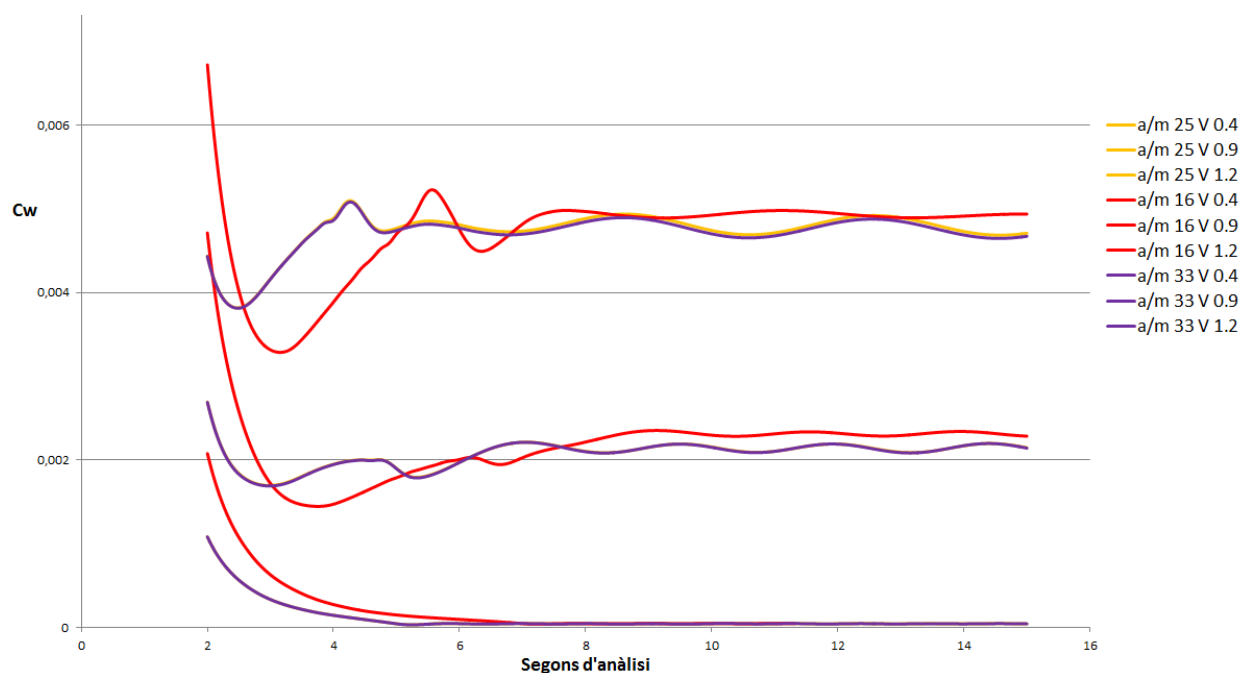


Figura 13. Resultats a estudiar

$Fr = 0'45$

Ampliant 7 vegades en la part més propera entre les diferents línies superiors entre 0'004 i 0'006 de resultats podem diferenciar la resposta hidrodinàmica per a les diferents amplades de canal per a una velocitat de 1'287 m/s:

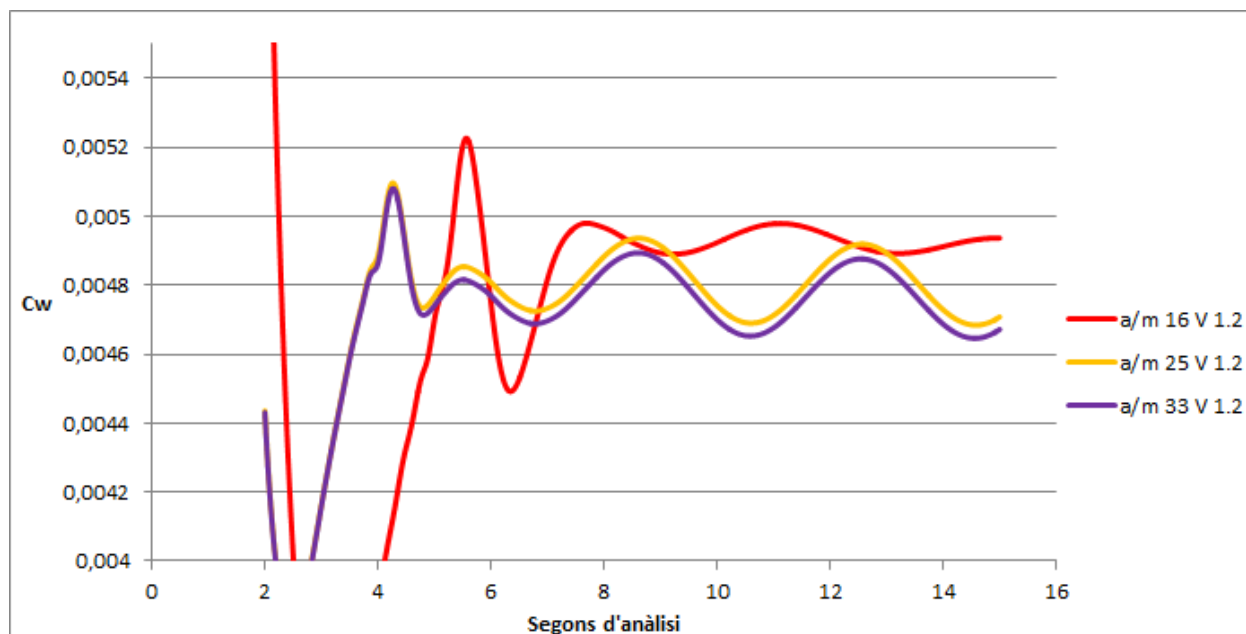


Figura 14. Resultats per a $Fr=0'45$

Podem observar com per a una relació amplada/màniga de 25 la reducció del C_w es pràcticament mínima. Pel que es consideraria que aquesta seria la distància òptima per a

dissenyar un canal hidrodinàmic; on amb el menor espai possible podríem aconseguir els resultats més precisos.

A la taula següent s'exposa quina seria la desviació, per tant correcció a aplicar, per a cada un dels casos. Considerant que com més proper a zero sigui aquest numero menor és la desviació. Una menor desviació implica una millor qualitat i fiabilitat en els resultats obtinguts.

L	B	T	Ax	b	A	m	Fr	$\Delta V/V$
1	0,05	0,0625	0,00104	0,8333	0,6944	0,0015	0,45	0,00144
1	0,05	0,0625	0,00104	1,24995	1,0416	0,001	0,45	0,00071
1	0,05	0,0625	0,00104	1,6666	1,3888	0,00075	0,45	0,00043

Taula 2. Correcció de Tamura per a $F=0'45$

$Fr = 0'32$

Ampliant 25 vegades en la part més propera a 0'002 de resultats podem diferenciar la resposta hidrodinàmica per a les diferents amplades de canal per a una velocitat de 0'939 m/s:

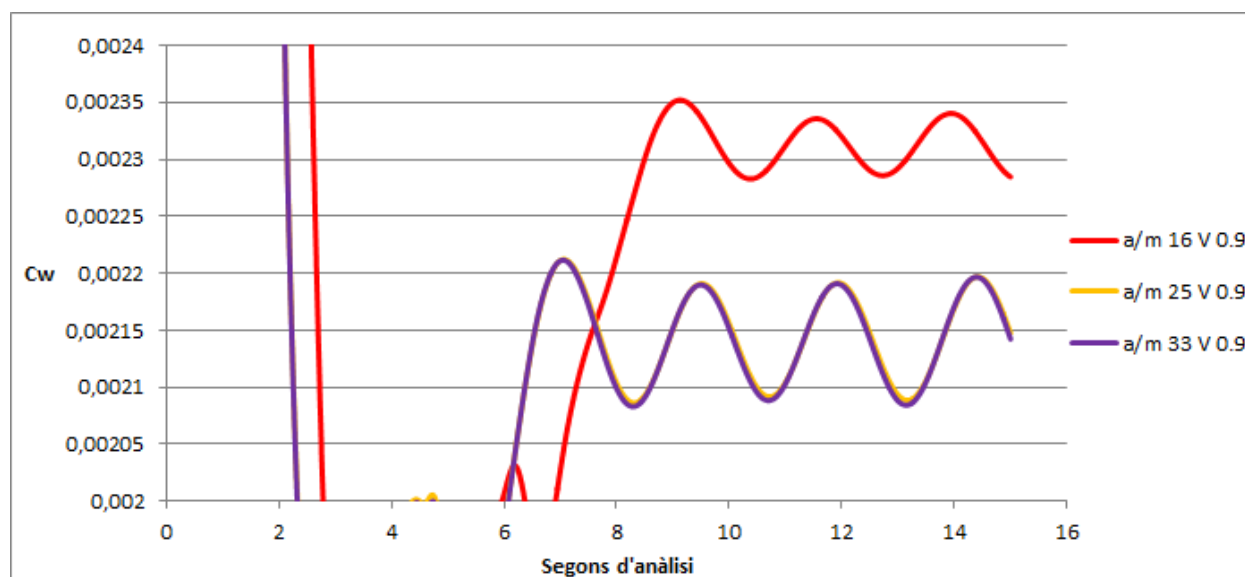


Figura 15. Resultats per a $Fr=0'32$

Ampliant encara més fins al punt de perdre de vista la línia vermella, representativa de l'amplada base, seria possible apreciar de manera més clara la diferencia entre les línies groga y lila.

En aquest cas es possible veure com per fins a una relació amplada/màniga de 25 la reducció del C_w es notable. Pel que es consideraria que aquesta seria la distancia òptima també per a aquest nombre de Freude.

A la taula la reducció de desviació en relació a l'amplada de la base manté la mateixa línia de proporció que per a Froude 0'45.

L	B	T	Ax	b	A	m	Fr	$\Delta V/V$
1	0,05	0,0625	0,00104	0,8333	0,6944	0,0015	0,32	0,00128
1	0,05	0,0625	0,00104	1,24995	1,0416	0,001	0,32	0,00063
1	0,05	0,0625	0,00104	1,6666	1,3888	0,00075	0,32	0,00038

Taula 3. Correcció de Tamura per a $F=0'32$

$Fr = 0'15$

Ampliant 500 vegades en la part més propera a 0 de resultats podem diferenciar la resposta hidrodinàmica per a les diferents amplades de canal per a una velocitat de 0'429 m/s:

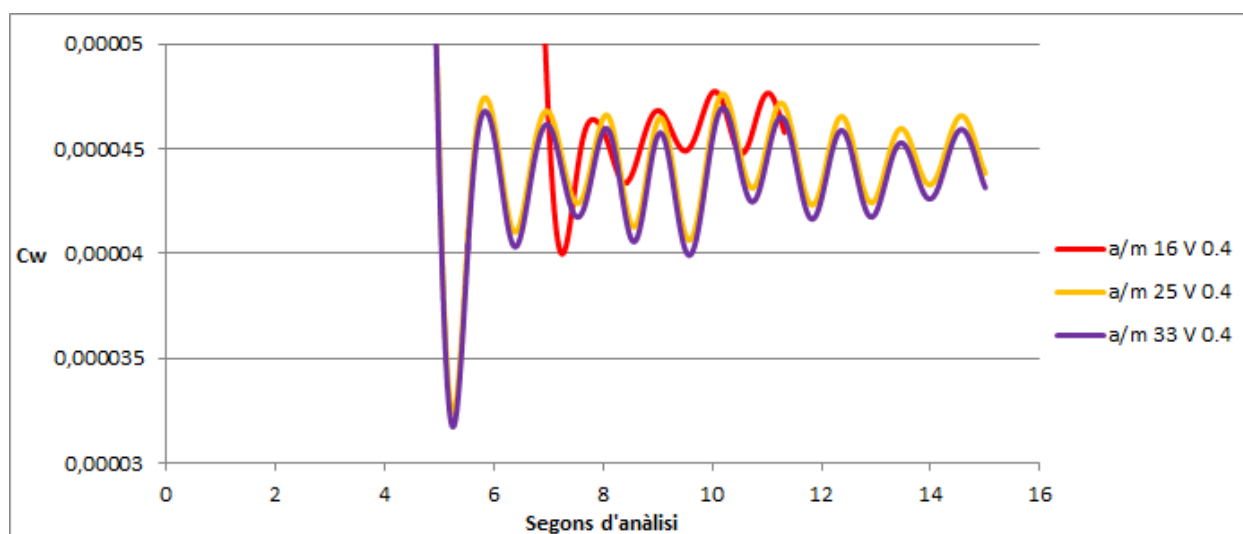


Figura 16. Resultats per a $Fr=0'15$

Amb una gran ampliació es possible apreciar que la proporció de diferencia entre l'amplada base i les seves ampliacions es mínima. En aquest cas es consideraria que l'opció més òptima seria relació amplada/màniga de 16'66; ja que per a tant poc numero de Freud les ones generades son menyspreables considerant l'efecte que generen d'interferència a l'actuació del model.

A la taula la reducció de desviació en relació a l'amplada de la base manté la mateixa línia de proporció que per a Froude anteriors. On observem que la reducció de la correcció per a cada una de les velocitats es produeix de forma exponencial.

L	B	T	Ax	b	A	m	Fr	$\Delta V/V$
1	0,05	0,0625	0,00104	0,8333	0,6944	0,0015	0,15	0,00118
1	0,05	0,0625	0,00104	1,24995	1,0416	0,001	0,15	0,00058
1	0,05	0,0625	0,00104	1,6666	1,3888	0,00075	0,15	0,00035

Taula 4. Correcció de Tamura per a $F=0'15$

Conclusió

Analitzant les gràfiques generades podem observar com per a numero de Froude entre 0'32 i 0'45 el C_w és pràcticament igual a partir d'una amplada de canal superior a setze vegades la màniga del model a analitzar.

Per altra banda la correcció de velocitat degut al efecte d'ones de Tamura és més baix per a Froudes entre 0'15 i 0'32. A més amplada de canal i menys velocitat menor es la correcció de Tamura necessària.

Per tant, amb totes les dades fins ara estudiades podem afirmar que a partir de l'amplada de 1'0416 metres (relació amplada/màniga de 25) veiem segons els gràfics que s'obté un òptim coeficient de resistència. Per tant a partir d'aquesta mesura no caldria engrandir més el canal ja que els guanys a nivell de precisió serien mínims.

Com a fita per a concloure el treball, segons els resultats obtinguts, per a establir una relació entre el model i l'amplada de canal, per a unes formes de carena Wigley amb una profunditat de 0'8333 metres; es considera que la formula a establir per a futurs estudis és la següent.

$$\frac{b}{B} = 16'66$$

Futurs estudis

Per a la millora en la precisió i fiabilitat dels resultats seria convenient seguir la mateixa metodologia però donant més temps d'anàlisi al programa per a una millora en la precisió i un major rang en les variables (distàncies i sobretot velocitats), ja que per motius tècnics no ha sigut possible l'anàlisi complet per a un 50% i un 100% més de la profunditat treballada durant el projecte.

Entre els casos fallits trobem en primer lloc a les reducció d'amplada per a la mateixa profunditat de canal. Aquest seria un bon punt per on començar a revisar el codi algorítmic utilitzat.

Seguir fent anàlisis per a diferents profunditats però mantenint el Froude, com ja es va aconseguir fer per a $Fr=0.15$. Representat en blau en la gràfica general de C_w :

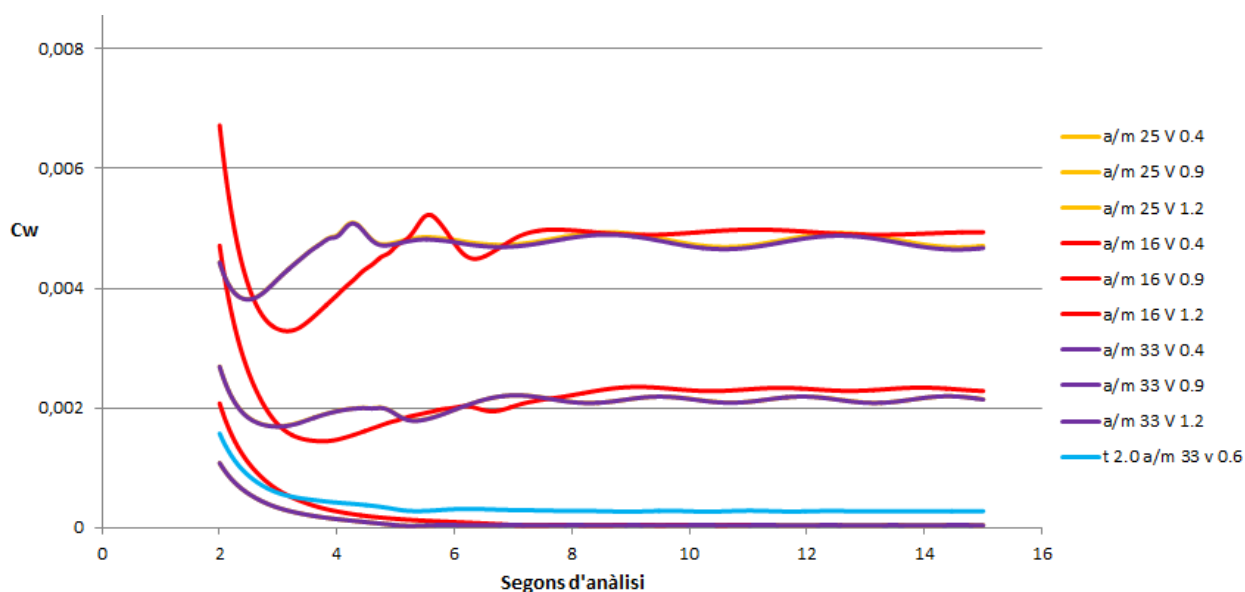


Figura 17. Gràfica dels resultats vàlids

Bibliografía

- D. José Antonio Aláez Zazurca, D. Luis Pérez Rojas, D. Ricardo Abad Arroyo, D. Francisco Pérez Arribas, D. Antonio Souto Iglesias. XL Sesiones técnicas de ingeniería naval. “Reparaciones/Transformaciones Navales y Acuicultura”. Islas Canarias, Noviembre 2001. “El punto de vista hidrodinámico del alargamiento de buques. Experiencias en el Canal de la ETSIN.”
[Consulta: 22 octubre 2018]. Disponible a:
<file:///C:/Users/%C3%81lvaro/Downloads/El%20punto%20de%20vista%20hidrodin%C3%A1mico%20del%20alargamiento%20de%20buques%20.pdf>
- Compass Ingeniería y Sistemas, SeaFEM – Validation case 2, Wigley hull, Version 14.0.0.
[Consulta: 22 octubre 2018]. Disponible a:
<http://www.compassis.com/compass/es/Productos/SeaFEM>
- Kinya Tamura. Blockage corrector and their appraisal.
[Consulta: 25 octubre 2018]. Disponible a:
<file:///C:/Users/%C3%81lvaro/Downloads/39%E5%B7%BB1%E5%8F%B71%E5%BD%9E18%20.pdf>
- Raúl Atienza Martín, Luis Pérez Rojas, Adolfo Marón Loureiro. “El efecto del bulbo de proa en el comportamiento del buque en la mar (trabajos experimentales)”. OCEAN 2000 Valdivia, Chile. 25-27 Octubre.
[Consulta: 25 octubre 2018]. Disponible a: <
<file:///C:/Users/%C3%81lvaro/Downloads/El%20efecto%20del%20bulbo%20de%20proa%20en%20el%20comportamiento%20del%20buque%20.pdf>
- Y. Sian, A. Maimun*, A. Priyanto, Yasser M. Ahmed, M. Nakisa, Rahimuddin Numerical Investigation for Resistance Characteristics of LNG Carrier (2014). Marine Technology Centre, Universiti Teknologi Malaysia.
[Consulta: 31 octubre 2018]. Disponible a:
<https://jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/3272/2454>
- WP2: Marine Energy System Testing - Standardisation and Best Practice Deliverable 2.23 Review of Tow Tank Limitations, (2014). EC FP7 Capacities: Research Infrastructures, Grant Agreement (No. 262552)
[Consulta: 31 octubre 2018]. Disponible a: <http://www.marinet2.eu/wp-content/uploads/2017/04/D2.23-Review-of-Tow-Tank-Limitations-1.pdf>
- Aalto University, School of Engineering. Kul-24.3200 Introduction of Marine Hydrodynamics, Resistance: Restricted water (2015)

[Consulta: 31 ottobre 2018]. Disponibile a:
<https://mycourses.aalto.fi/course/index.php?categoryid=3>

- Università degli Studi di Genova, Materiale didattico: Resistenza d'onda, Coeff. di portanza, Fondale limitato. (2013,2014,2015,2016,2017).
[Consulta: 31 ottobre 2018]. Disponibile a: <https://unige.it/> (intranet)
- Propulsion Committee of the 28th ITTC, ITTC Quality System Manual: Recommended Procedures and Guidelines, 1978 Performance Prediction Method. (2017)
[Consulta: 31 ottobre 2018]. Disponibile a: <https://www.ittc.info/media/8009/75-02-02-03.pdf>
- Propulsion Committee of the 28th ITTC, ITTC Quality System Manual: Resistance Test. (2017)
[Consulta: 31 ottobre 2018]. Disponibile a: <https://www.ittc.info/media/8023/75-02-03-017.pdf>
- Propulsion Committee of the 26th ITTC, Final Report and Recommendations to the 26th ITTC, Volume I. (2011)
[Consulta: 31 ottobre 2018]. Disponibile a: <https://eprints.soton.ac.uk/55290/>
- Resistance Committee of the 26th ITTC, Final Report and Recommendations to the 26th ITTC, Volume I. (2011)
[Consulta: 31 ottobre 2018]. Disponibile a:
https://www.researchgate.net/publication/299428314_The_Propulsion_Committee_final_report_and_recommendations_to_the_25th_ITTC
- A.F.Molland, J.F.Wellicome and P.R. Couser, Department of ship science, Faculty of engineering and applied science, Univerity of Southampton. Resistance experiments on a systematic series of high speed displacement catamaran forms: variation of length-displacement ratio and breath-draught (Ship Science Report 71, 1994, ISSN 0140-3818 SSSU 71)
[Consulta: 31 ottobre 2018]. Disponibile a: <https://eprints.soton.ac.uk/46442/1/071.pdf>
- MIT Open Course Ware. Open-Channel flow, chapter 5 (2016).
[Consulta: 31 ottobre 2018]. Disponibile a: <https://ocw.mit.edu/courses/earth-atmospheric-and-planetary-sciences/12-090-introduction-to-fluid-motions-sediment-transport-and-current-generated-sedimentary-structures-fall-2006/course-textbook/ch5.pdf>
- Specialist Committee on Computational Fluid Dynamics, Final Report and Recommendations to the 26th ITTC, Volume I. (2011)
[Consulta: 1 novembre 2018]. Disponibile a: <https://ittc.info/media/5528/09.pdf>
- Specialist Committee on Scaling of Wake Field, Final Report and Recommendations to the 26th ITTC, Volume I. (2011)

[Consulta: 1 novembre 2018]. Disponibile a: <https://ittc.info/downloads/quality-systems-manual/>

- Università degli Studi di Genova, Retrieved from Knovel web, chapter 7, Basic Aspects of the finite element method. (2015).

[Consulta: 1 novembre 2018]. Disponibile a : <https://unige.it/> (intranet)

- Society of Naval Architects and Marine Engineers, Materiale didattico: Resistenza d'onda, Coeff. di portanza, Fondale limitato. (2013,2014,2015,2016,2017).

[Consulta: 15 novembre 2018]. Disponibile a: <https://unige.it/> (intranet)

Annexes

***** VER. 14, 0, 1, 0 *****

*** WARNING! ***

--> Number of requested CPUs is larger than the actual number of CPUs(4). Number of CPUs is fixed to 4.

--> Reading global mesh

--> Reading body meshes

--> Reading body "Body Auto1" mesh

--> Reading free surface mesh

--> Reading outlet mesh

--> Reading bottom mesh

--> Reading wall mesh

--> Reading H Free Surface mesh

--> H_fs boundary condition has not been assigned on any surface

--> Reading Airgap Free Surface mesh

--> Airgap boundary condition has not been assigned on any surface

--> Reading Transom Stern mesh

--> Transom Stern boundary condition has not been assigned on any surface

--> Transom Stern Trailing edge boundary condition has not been assigned on any surface

--> Inputs read OK

--> dz min =0.00365465m at node 14737

--> dh min at free surface=0.0075877m at node 14737

--> Time step =0.00242298s

--> Estimated maximum Courant number= 0.3

--> Minimum wave period =0s

--> Assembly done OK

--> Initialization done OK

--> Transom stern has not been assigned

--> Mass_1[kg]=1.48056

--> XG_1[m]=0

--> YG_1[m]=0

--> ZG_1[m]=-0.00583333

```
--> lxx_1[kg*m2]=0.0925347
--> lyy_1[kg*m2]=0.0925347
--> lzz_1[kg*m2]=0.0925347
--> lxy_1[kg*m2]=-0
--> lxz_1[kg*m2]=-0
--> lyz_1[kg*m2]=-0
--> **** "Body Auto1" ( 1 ) body data ****
--> XC_1[m]=6.50889e-006
--> YC_1[m]=0.0162765
--> ZC_1[m]=-0.0233729
--> Wet_body_surface_1=0.0750386
--> Volume_1[m3]=0.00143852
--> Displacement_1[kg]=1.47449
--> K_1[3][3][N/m]=348.426
--> K_1[3][4][N/rad]=7.09568
--> K_1[3][5][N/rad]=-2.23153e-014
--> K_1[4][4][Nm/rad]=-0.0487235
--> K_1[4][5][Nm/rad]=-3.02458e-015
--> K_1[4][6][Nm/rad]=-9.41171e-005
--> K_1[5][5][Nm/rad]=17.9319
--> K_1[5][6][Nm/rad]=-0.235355
--> A_Flot_1[m2]=0.034663
--> GM_roll_1[m]=-0.00336959
--> GM_pitch_1[m]=1.24012
--> Problem matrices built OK
```